

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der häufig benutzten Formelzeichen	12
1. Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung der Kältetechnik	15
1.1. Vom Wesen der Kälte	15
1.1.1. Vorstellungen der kinetischen Wärmetheorie	15
1.1.2. Temperatur und Aggregatzustände	16
1.1.3. Diffusion und chemische Reaktion	16
1.1.4. Biologische Vorgänge	17
1.2. Über die Geschichte der Kältetechnik	19
1.2.1. Entwicklung bis 1800	19
1.2.2. Entwicklung im 19. Jahrhundert	19
1.2.3. Die Kältetechnik im 20. Jahrhundert	21
1.2.3.1. Erweiterung des Temperaturgebietes	21
1.2.3.2. Größe der Anlagen	21
1.2.3.3. Verbesserung der Effektivität	22
1.2.3.4. Triebkräfte der Entwicklung	22
1.2.3.5. Neue Wirkprinzipien	22
1.2.3.6. Organisation der Kältetechnik	23
1.2.3.7. Stellung der Kältetechnik in der Wirtschaft	23
1.2.3.8. Kältetechnik zur Rationalisierung industrieller Prozesse	24
1.2.3.9. Kälte in Kultur, Sport und Medizin	25
2. Bemerkungen zu den thermodynamischen Grundlagen der Kälteprozesse	26
2.1. Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle eines idealen Gases und daraus folgende Schlüsse zur Kälteerzeugung	26
2.1.1. Das „Aussortieren“ der schnellen Teilchen	27
2.1.2. Verringerung der kinetischen Energie der Teilchen durch Volumen- arbeit	27
2.1.3. Umwandlung der inneren kinetischen Energie in innere potentielle Energie	28
2.1.4. Weitere Umwandlungen	28
2.1.5. Umwandlungen im „Elektronengas“	28
2.2. Unterlagen zur Prozeßbetrachtung	29
2.2.1. Diagramme und Zustandsgleichungen	29
2.2.2. Dampfdruckkurve	31
2.2.3. Vergleichsprozesse	31
2.3. Arbeitsprozesse der Kältetechnik	32
2.3.1. Kaltdampfmaschinen	32
2.3.1.1. Mechanische Energie	33
2.3.1.2. Thermische Energie	33
2.3.1.3. Strahlverdichtung	35

2.3.2.	Kaltgasmaschinen	35
2.3.2.1.	Kaltgasmaschine mit isentroper Entspannung	35
2.3.2.2.	Kaltgasmaschine mit isenthalper Entspannung	36
2.3.2.3.	Prozesse mit Regenerierung	38
2.3.3.	Mengenzustandsänderungen	38
2.3.3.1.	Ausströmvorgang	39
2.3.3.2.	Einströmvorgang	40
2.3.4.	Thermoelektrische Kälteerzeugung	41
3.	Arbeitsstoffe	47
3.1.	Kältemittel	47
3.1.1.	Allgemeines	47
3.1.2.	Vergleich wichtiger Kältemittel	53
3.1.3.	Eigenschaften und Verwendung	59
3.1.3.1.	Ammoniak	59
3.1.3.2.	Wasser	60
3.1.3.3.	Halogenkältemittel	60
3.1.3.4.	Kohlenwasserstoffe	70
3.1.3.5.	Kältemittelmischungen	71
3.1.3.6.	Zusammenfassende Betrachtung des Kältemiteleinsatzes	75
3.1.4.	Arbeitsstoffpaare	75
3.2.	Arbeitsstoffe in Kaltgasmaschinen	79
3.2.1.	Allgemeines	79
3.2.2.	Eigenschaften und Verwendung	81
3.2.2.1.	Methan	81
3.2.2.2.	Luft und ihre Hauptbestandteile	81
3.2.2.3.	Wasserstoff	83
3.2.2.4.	Helium	85
3.3.	Kälteträger	87
3.4.	Messung, Berechnung und Darstellung von Stoffeigenschaften	91
3.4.1.	Einführung	91
3.4.2.	Thermische und kalorische Zustandsgrößen	93
3.4.2.1.	Reine Stoffe	93
3.4.2.2.	Mehrstoffsysteme	98
3.4.3.	Spezifische Wärmekapazität, Isentropenexponent, Schallgeschwindigkeit	100
3.4.4.	Wärmeleitfähigkeit	104
3.4.5.	Viskosität	107
3.4.6.	Diffusion	108
3.4.7.	Oberflächenspannung	108
4.	Bauelemente von Kälteanlagen	111
4.1.	Verdichter	111
4.1.1.	Einteilung	111
4.1.2.	Ermittlung der Antriebsleistung	113
4.1.3.	Einsatzbereiche der verschiedenen Bauarten	116
4.1.4.	Hubkolbenverdichter	120
4.1.4.1.	Berechnungsgrundlagen	121
4.1.4.2.	Ausführung, Bauteile	125
4.1.4.3.	Sonderbauarten	131

4.1.5. Schraubenverdichter	131
4.1.6. Turboverdichter	136
4.2. Entspannungsorgane	138
4.2.1. Entspannungsorgane für flüssige Kältemittel	138
4.2.2. Drosselventile für Gase	141
4.2.3. Entspannungsmaschinen	142
4.3. Wärmeübertrager	144
4.3.1. Allgemeines	144
4.3.2. Kondensatoren	145
4.3.2.1. Wärmeübergang bei der Kondensation	145
4.3.2.2. Bauformen	147
4.3.3. Verdampfer	148
4.3.3.1. Wärmeübergang bei der Verdampfung	148
4.3.3.2. Bauformen	153
4.3.4. Innere und sonstige Wärmeübertrager	155
4.3.4.1. Rohrwärmeübertrager	156
4.3.4.2. Regeneratoren	156
4.3.4.3. Plattenwärmeübertrager	157
4.4. Apparate zur Rektifikation und Absorption	157
4.4.1. Grundlegende Beziehungen	158
4.4.2. Rektifikationseinrichtungen	163
4.4.3. Absorber	164
4.5. Rohrleitungen	164
4.6. Regelorgane	167
4.6.1. Allgemeines, Aufbau, Einteilung	167
4.6.2. Spezielle Aufgaben	168
4.6.3. Regler des Kältemittelkreislaufs	168
4.7. Sonstige Bauelemente und Zubehör	173
4.8. Kälteisolierung	173
5. Grundsaltungen	179
5.1. Kompressionskältemaschinen	180
5.1.1. Leistungszahl und Gütegrad	181
5.1.2. Inneres und äußeres Verhalten	182
5.1.3. Theoretischer Vergleichsprozess	182
5.1.4. Überhitzung und Unterkühlung	185
5.1.5. Der wirkliche einstufige Kreisprozeß und ausgeführte Anlagen	190
5.1.6. Mehrstufige Prozesse	193
5.1.6.1. Zweistufige Verdichtung	194
5.1.6.2. Zweistufige Verdichtung und Entspannung	194
5.1.6.3. Zweistufige Verdichtung und Entspannung sowie Zwischenkühlung durch das Kältemittel	195
5.1.6.4. Zweistufige Verdichtung, Entspannung und Verdampfung	198
5.1.6.5. Besonderheiten beim Einsatz von Schrauben- und Turboverdichtern	199
5.1.6.6. Ein Verfahren der Trockeneisherstellung als dreistufiger Prozeß	200
5.1.7. Kaskadenkältemaschinen	202
5.1.8. Gütegrade ausgeführter Kompressionskältemaschinen	204
5.1.9. Prozesse mit Kältemittelgemischen	205

5.2. Absorptionskältemaschinen	206
5.2.1. Wasser-Lithiumbromid-Anlage	208
5.2.2. Ammoniak-Wasser-Anlage	211
5.2.2.1. Einstufige Ausführung	211
5.2.2.2. Mehrstufige Ausführung	221
5.2.2.3. Verfahren mit druckausgleichendem Gas	223
5.3. Dampfstrahlkältemaschinen	225
5.4. Verbundschaltungen	228
5.5. Kaltgasmaschinen ohne Verflüssigung des Arbeitsmediums	231
5.5.1. Kaltgasmaschine nach dem Joule-Prozeß	232
5.5.2. Stirling-Kaltgasmaschine	237
5.5.3. McMahon-Gifford-Maschine	240
5.5.4. Wirbelrohr	242
5.6. Erzeugung sehr tiefer Temperaturen	242
5.6.1. Adiabate Entmagnetisierung	243
5.6.2. ³ Helium- ⁴ Helium-Lösungskältemaschine	244
6. Gasverflüssigung und Gasgemischzerlegung	246
6.1. Gasverflüssigung	246
6.1.1. Verflüssiger und Refrigerator	246
6.1.2. Minimale Verflüssigungsarbeit	247
6.1.3. Kreisprozesse mit Drosselung	248
6.1.3.1. Einfacher Linde-Prozeß	249
6.1.3.2. Linde-Prozeß mit Mitteldruckkreislauf	253
6.1.3.3. Linde-Prozeß mit äußerer Vorkühlung	253
6.1.3.4. Verfahren mit Entspannungsmaschinen	255
6.1.3.5. Verflüssigung von Wasserstoff und Helium	258
6.1.4. Drucklose Verflüssigung	261
6.2. Gasgemischzerlegung	262
6.2.1. Theoretische Zerlegungsarbeit	262
6.2.2. Luftzerlegung	263
6.2.2.1. Einsäulentrennapparat	264
6.2.2.2. Doppelsäulentrennapparat	266
6.2.2.3. Komplette Luftzerlegungsanlagen	268
6.2.3. Darstellung von Edelgasen	274
6.2.3.1. Argon	274
6.2.3.2. Helium und Neon	276
6.2.3.3. Krypton und Xenon	277
6.2.4. Zerlegung weiterer Gasgemische	278
6.2.4.1. Gewinnung von Helium aus Erdgas	278
6.2.4.2. Entfernung von Stickstoff aus Erdgas	280
6.2.4.3. Zerlegung des Restgases der Ammoniaksynthese	280
6.2.4.4. Gewinnung von Ethylen	282
6.2.4.5. Rektisol-Verfahren	283
6.3. Lagerung, Transport und Verdampfung tiefsiedender flüssiger Gase	284
6.3.1. Dewar-Gefäße	285
6.3.2. Bewegliche und ortsfeste Tanks	286
6.3.3. Großspeicher	287
6.3.4. Tankschiffe und Pipelines	289
6.3.5. Wiederverdampfung	289

7. Werk- und Hilfsstoffe	292
7.1. Konstruktionsmaterialien	292
7.1.1. Metallische Werkstoffe	292
7.1.2. Nichtmetallische Werkstoffe	297
7.2. Isolierstoffe	301
7.3. Trockenmittel	304
7.4. Schmiermittel	307
8. Beispiele der Kälteanwendung	310
8.1. Auswahl des Verfahrens der Kälteerzeugung	310
8.2. Optimierung	310
8.2.1. Iterative Optimierung	310
8.2.2. Statische Optimierung mittels mathematischen Modells	310
8.2.3. Dynamische Optimierung	313
8.3. Kühlkette	313
8.3.1. Abkühlen und Gefrieren	316
8.3.1.1. Luftgefrieren	317
8.3.1.2. Apparate zum Gefrieren in tiefkalten Flüssigkeiten	317
8.3.1.3. Gefrieren durch Kontakt mit kalten Platten	318
8.3.1.4. Kälteleistung beim Gefrieren	318
8.3.2. Auftauen	319
8.3.3. Kühl- und Gefrierlagerung	319
8.3.3.1. Kühllast eines Kühlraumes	319
8.3.3.2. Gestaltung der Kühl- und Gefrierlager	322
8.3.4. Kühltransporte	324
8.3.4.1. Seetransporte	324
8.3.4.2. Eisenbahntransporte	324
8.3.4.3. Gekühlte Straßenfahrzeuge	327
8.3.4.4. Entwicklung des Landtransportes	327
8.3.5. Eiserzeugung	327
8.4. Gefriertrocknung	329
8.4.1. Behandlung von Fleisch	329
8.4.2. Flüssige Produkte	329
8.5. Kälte in der Klimatisierung	330
8.6. Wärmepumpen	331
8.7. Kälte für den Sport	333
8.8. Anwendung der Kryotechnik	334
8.8.1. Kryostaten	335
8.8.2. Verwendung der Supraleitung	336
8.8.2.1. Kabel	338
8.8.2.2. Magnete	338
9. Literaturverzeichnis	342
10. Verzeichnis von Standards und technischen Vorschriften	351
11. Sachwörterverzeichnis	352